

## SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA. APLICACIÓN AL RIEGO DE UN CAMPO DE GOLF CON AGUAS REGENERADAS (PALS, GIRONA)

S Fabregat<sup>1</sup>, L Candela<sup>1</sup> y J Valdes-Abellan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental-DECA, Universitat Politècnica de Catalunya,  
Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona. [sfabregat@gencat.cat](mailto:sfabregat@gencat.cat), [lucila.candela@upc.edu](mailto:lucila.candela@upc.edu)

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Crta. de San Vicente s/n.  
03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. [javier.valdes@ua.es](mailto:javier.valdes@ua.es)

**RESUMEN.** En julio del año 2000 se comenzó a utilizar agua residual regenerada procedente de la EDAR del municipio de Pals (Girona) para el riego del campo de golf “Serres de Pals”. Con el objeto de evaluar las posibles afecciones en el suelo y el acuífero subyacente por la utilización de este tipo de agua se instrumentó la zona no saturada (ZNS) y el acuífero subyacente. Durante dos años (junio 2000-julio 2002) se llevó a cabo la toma de datos y se realizaron muestreos del agua de riego, de la ZNS y del acuífero.

En este trabajo se presenta el modelo de flujo de agua en la ZNS realizado con el código HYDRUS-1D a partir de los datos obtenidos *in situ* en el campo de golf “Serres de Pals”. El modelo ha sido calibrado empleando datos de humedad y succión observados en el periodo julio 2000 – julio 2001). Se adoptó el modelo de Mualem – van Genuchten y se ajustaron los parámetros de  $K_s$ ,  $\alpha$  y  $n$ .  $K_s$  osciló entre  $6.37 \cdot 10^{-6}$  m/s para la capa superior y los  $4.05 \cdot 10^{-6}$  m/s para la capa inferior, el parámetro

$n$  siempre fue superior a 1.35 en las tres capas, y el parámetro  $\alpha$  varió entre  $10.2 \text{ m}^{-1}$  en la capa superior y  $1.5 \text{ m}^{-1}$ ; estos valores son coherentes respecto la caracterización previa y las observaciones de campo. Finalmente, se realizó la validación del modelo durante el periodo (julio 2001 – diciembre 2001), obteniendo unos buenos ajustes (índice de correlación  $R^2$  de 0.901, e índices MAE y RMSE de 0,042 i 0.052 respectivamente); lo que permitirá usar el modelo como base para la elaboración de un modelo de transporte.

**ABSTRACT.** Starting in July 2000, treated wastewater of urban origin has been used for the irrigation of the “Serres de Pals” golf course (Girona-Spain). To evaluate if the soil and the aquifer underneath are affected by the application of this type of water, the vadose zone and the aquifer have been monitored. Data gathering from the irrigation water, soil profile and aquifer has been carried out during a period of two

years (june 2000 – july 2002). This research shows modelling of the water flux through the vadose zone from data collected in the “Serres de Pals” golf course, by using the HYDRUS-1D code. The model have been adjusted using the water content and the matritial presure data colected during the observation period (july 2000 – july 2001). The Mualem – van Genuchten model have been choosen and the hydraulic parameters  $K_s$ ,  $\alpha$  and  $n$  have been adjusted.  $K_s$  ranged from  $6.37 \cdot 10^{-6}$  m/s in the upper layer to  $4.05 \cdot 10^{-6}$  m/s in the lower one,  $n$  shape parameter was above 1.35 in all three layers, and  $\alpha$  shape parameter oscillated between  $10.2 \text{ m}^{-1}$  in the upper layer and  $1.5 \text{ m}^{-1}$ . These values are consistent with the previous characterization and the field observations. Finally, after validation (july 2001 – december 2001) consistent results have been obtained (The correlation index value  $R^2$  of 0.901 and the indexes MAE and RMSE of 0.042 and 0.052 respectively). This model, once validated, will be used as a basis to develop a transport model.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el último cuarto del siglo XX y principios del XXI, los beneficios de la reutilización del agua residual han sido reconocidos en numerosos países, siendo objeto de numerosas publicaciones y manuales para su aplicación en riego y/o recarga artificial (Pettygrove y Asano, (1984); Mujeriego y Asano, (1991); USEPA, (1992); Real Decreto 1620/2007).

En España, actualmente, la mayoría de los campos de golf de nueva creación ya

utilizan aguas residuales urbanas tratadas, y es de obligado uso en este tipo de complejos prácticamente en todas las CC.AA. El uso de aguas regeneradas está regulado por el Real Decreto 1620/2007 y establece la calidad que deben tener las aguas en función de su uso, y los controles mínimos que se deben establecer. Por lo que respecta a la posible afección a las aguas subterráneas, los Organismos de Cuenca pueden solicitar que se realicen los correspondientes estudios, si existe riesgo de afección.

Sin embargo, los estudios realizados para evaluar su impacto sobre las aguas subterráneas no son tan numerosos como los dedicados a la posible afección a la salud de los usuarios y los habitantes del entorno. Entre ellos se puede citar a Cohen, et. al. (1999); Fabregat, et al. (2002) y Candela, et. al. (2007), que estudian la evolución hidroquímica y microbiológica de las aguas subterráneas por el uso de agua residual tratada para riego durante periodos que oscilan entre los 2 y 3 años.

El objetivo final del estudio en el que se enmarca este trabajo es el análisis del riesgo de contaminación asociado al riego con aguas regeneradas. Para ello, un primer paso consistió en estudiar *in situ* el flujo de agua a través de la ZNS en una parcela experimental. Con la finalidad de simular el flujo en la ZNS, y para poder integrar, calibrar y validar los datos disponibles, se ha realizado un modelo numérico del flujo mediante el código HYDRUS-1D (Šimůnek, et al., 2016). HYDRUS, en sus diversas versiones, ha sido ampliamente utilizado para simular el flujo de agua y solutos en medios porosos parcialmente saturados (Rubio, et. al. 2005, Jiménez et. Al. 2007, Valdes-Abellan et. al. 2014 and 2015, etc).

## 2. SITUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el campo de golf “Serres de Pals”, situado en el municipio de Pals, Baix Empordà (Girona).

Desde el punto de vista hidrogeológico el área forma parte del sistema Baix Ter–Gavarres. El campo de golf se sitúa entre las primeras estribaciones del macizo de Les Gavarres y la llanura aluvial del río Ter, zona de origen lacustre ocupada actualmente por campos de arroz y muy cerca del mar.

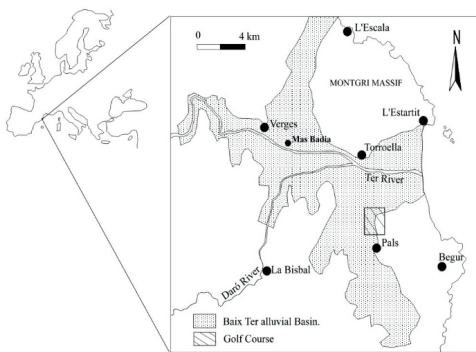


Fig. 1. Situación del área experimental.

El sistema hidrogeológico Baix Ter–Gavarres comprende la llanura fluvio-deltaica del río Ter, el aluvial del río Daró y la parte septentrional del macizo de Les Gavarres formado por el zócalo paleozoico y la cobertera paleógena, muy fracturados. Una extensa presentación de las características hidrogeológicas y la contaminación de las aguas no es objeto de este trabajo, que han sido ampliamente estudiadas por Montaner et al. (1995) y Mas-Plà et al. (1998).

En la zona se definió una parcela experimental instrumentada (ZNS) cuyo monitoreo se extendió desde julio de 2000 hasta julio de 2002.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología seguida en la investigación parte de la caracterización de la ZNS, su monitoreo in situ y posterior simulación de los resultados obtenidos. La bondad del ajuste se basó en observación visual y el análisis estadístico de los valores residuales.

### 3.1. Caracterización física y textural de la ZNS

Para la caracterización física del medio, se realizaron varios sondeos de reconocimiento con una sonda manual helicoidal Eijelkamp® hasta 2 m de profundidad aproximadamente, donde se detectó el sustrato terciario. Se tomaron muestras inalteradas de la ZNS cada 30 cm mediante cilindros metálicos (5 x 5 cm) y una muestra alterada para determinaciones en laboratorio.

Los detalles de la metodología empleada para obtener los diferentes parámetros, así como los resultados detallados están descritos en Candela, et. al. (2001).

El resumen de los resultados correspondientes a los parámetros físicos y texturales de los dos perfiles iniciales se muestra en las tablas 1 y 2.

En el perfil 1 destaca una capa superficial, formada por arenas de origen antrópico debida a la transformación de zona agrícola a campo de golf. Las muestras a 2 m de profundidad, en los dos perfiles,

**Tabla 1.** Características físicas y texturales de la ZNS (perfil 1).

| Profundidad (m) | Densidad | Porosidad | $K_{sat}$ (m/s) | $C_u$ | $C_c$  | % finos |
|-----------------|----------|-----------|-----------------|-------|--------|---------|
| 0               | 1.55     | 0.42      | 2.93E-02        | 8.33  | 125.45 | 24.84   |
| 0.3             | 1.34     | 0.50      | 1.93E-03        | 20.78 | 0.64   | 42.60   |
| 0.6             | 1.48     | 0.44      | 1.83E-03        | 20.00 | 0.91   | 40.10   |
| 0.9             | 1.70     | 0.36      | 1.88E-03        | 19.74 | 1.27   | 39.13   |
| 1.2             | 1.66     | 0.37      | 1.01E-04        | 24.47 | 2.60   | 29.89   |
| 1.5             | 1.57     | 0.41      | 1.14E-04        | 21.00 | 3.05   | 27.99   |
| 1.8             | 1.67     | 0.37      | 2.08E-04        | 27.69 | 4.19   | 31.59   |
| 2               | 1.92     | 0.28      | 1.23E-04        | 26.00 | 0.74   | 44.31   |

**Tabla 2.** Características físicas y texturales de la ZNS (perfil 2).

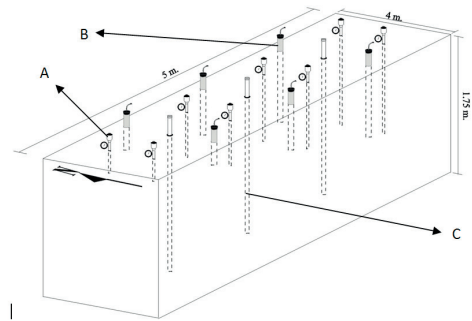
| Profundidad (m) | Densidad | Porosidad | $K_{sat}$ (m/s) | $C_u$ | $C_c$ | % finos |
|-----------------|----------|-----------|-----------------|-------|-------|---------|
| 0               | 1.18     | 0.56      | 9.14E-04        | 17.92 | 0.72  | 54.38   |
| 0.3             | 1.34     | 0.50      | 1.33E-03        | 20.31 | 0.48  | 47.34   |
| 0.6             | 1.39     | 0.48      | 1.10E-03        | 24.14 | 0.65  | 44.32   |
| 0.9             | 1.82     | 0.31      | 1.21E-03        | 24.59 | 0.68  | 43.24   |
| 1.2             | 1.79     | 0.33      | 3.71E-05        | 31.58 | 0.71  | 40.02   |
| 1.5             | 1.60     | 0.40      | 1.14E-04        | 16.00 | 4.00  | 27.99   |
| 1.8             | 1.70     | 0.36      | 2.41E-04        | 25.71 | 4.00  | 31.60   |
| 2               | 1.90     | 0.28      | 6.38E-05        | 30.56 | 0.65  | 51.10   |

corresponden al horizonte de alteración del zócalo eoceno con características diferentes.

### 3.2. Monitorización de la ZNS

La parcela experimental se instrumentó según se muestra en la Figura 2. En el centro se situaron 8 tensiómetros a 0.3, 0.6, 0.9 y 1.2 m de profundidad (por duplicado), para medida de la succión del terreno en profundidad. Para el muestreo de agua en la ZNS se instalaron 6 cápsulas de succión a 0.3, 0.6 y 0.9 m de profundidad (por duplicado). La instrumentación se completó con la instalación 3 tubos de acceso para medida de perfiles de humedad del terreno con TDR (IMKO TRIME-FM®).

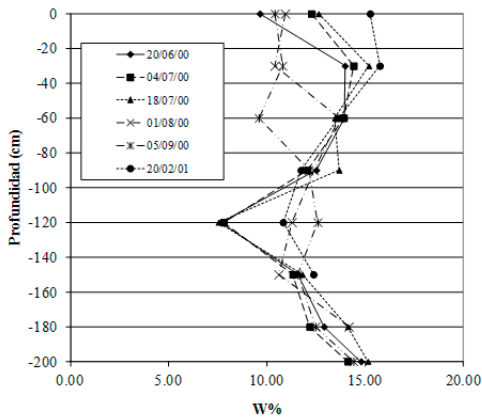
Las medidas de succión matricial y humedad se realizaron con una periodicidad mínima mensual.



**Fig. 2.** Esquema de la parcela experimental. A: Tensiómetros. B: Cápsulas de succión. C: Tubos de acceso de sonda TDR.

En la figura 3 se muestran los perfiles de humedad correspondientes a diferentes campañas del periodo de monitorización.

La variabilidad en el contenido de humedad fue mayor en los horizontes superficiales, más expuestos a las variaciones meteorológicas y mucho más estables en horizontes situados por debajo de 1.50 m de profundidad.



**Fig 3.** Variación del contenido de humedad en el perfil del suelo a lo largo del tiempo.

### 3.3. Datos climáticos y riego

Los datos climáticos empleados en este estudio proceden de la estación meteorológica situada en el Centro Experimental de Mas Badia (IRTA, Generalitat de Catalunya) situada en el municipio de La Tallada d'Empordà. La estación meteorológica se sitúa a unos 10 km de la parcela experimental en terreno prácticamente llano.

Para este trabajo se han utilizado registros diarios de temperatura, pluviometría, humedad relativa, viento y radiación solar para el periodo comprendido entre julio de 2000 y diciembre de 2002.

Durante el periodo simulado la pluviometría fue de 518 mm en el año 2000, y 609 mm en el año 2001; inferior al valor medio de la estación: 646 mm durante el periodo 1999 - 2014.

Los datos del riego aplicado ( $\text{m}^3/\text{día}$  aplicados en todo el campo) fueron facilitados por los propietarios del campo de golf a partir de las lecturas de contador. El volumen de agua de riego aplicada fue de  $0,214 \text{ hm}^3$  el año 2000 y  $0,2852 \text{ hm}^3$  el

2001; con una dotación media durante los meses de verano de unos 5,7 mm.

### 3.4. Modelación del flujo

El flujo de agua se simuló mediante HYDRUS-1D, v4.16. HYDRUS es un modelo numérico de elementos finitos que puede simular el flujo de agua, calor y solutos, a través de medios porosos en condiciones de saturación variable (Šimůnek, J et al., 2016).

Para simular el flujo de agua unidimensional en un medio poroso no deformable, parcialmente saturado, y extracción por las raíces HYDRUS-1D utiliza la ecuación de Richards modificada (1). Para ello se base en: (I) la fase gaseosa no afecta al flujo de la fase líquida; (II) el flujo de agua debido a gradientes térmicos se considera despreciable.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + 1 \right] - S \quad (1)$$

Donde  $h$  es la presión matricial del agua [L],  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua [ $\text{L}^3\text{L}^{-3}$ ];  $t$  es el tiempo [T],  $x$  es la coordenada espacial vertical [L],  $S$  es el termino sumidero [ $\text{L}^3\text{L}^{-3}\text{T}^{-1}$ ];  $K$  = función de conductividad hidráulica no saturada, definida por la siguiente ecuación (2):

$$K(h) = K_s K_r(h) \quad (2)$$

Donde  $K_r$  es la conductividad hidráulica no saturada [-] Mualem (1976), y  $K_s$  la conductividad hidráulica saturada [ $\text{LT}^{-1}$ ].

Se define el término sumidero,  $S$ , como el volumen de agua extraído por unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo debido a la absorción de las plantas. En

este trabajo para la extracción de agua por parte de las plantas se adoptó el modelo lineal modificado de Feddes et al. (1978) que define este término como (3):

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (3)$$

Donde  $S_p$  es la absorción potencial [ $T^{-1}$ ], y  $\alpha(h)$  es la función adimensional de respuesta al estrés hídrico ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), y que refleja la reducción de la absorción por las raíces debida al estrés hídrico, en función de la presión matricial.

### 3.4.1. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos para suelos no saturados  $\theta(h)$  y  $K(h)$  de la ecuación (1), en general, son funciones no lineales de la presión matricial. HYDRUS-1D permite escoger entre cinco modelos analíticos diferentes para definir estas funciones.

La opción elegida en este trabajo para obtener la ecuación de la conductividad hidráulica no saturada en función de los parámetros de retención de agua en el suelo según (4, 5, 6 y 7), se basa en el modelo de van Genuchten (1980). Esta aproximación utiliza el modelo de distribución estadística del tamaño de poros de Mualem (1976), con porosidad simple, y sin considerar histéresis.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (7)$$

Donde  $S_e$  es la saturación efectiva [-];  $\theta_r$  y  $\theta_s$  representen el contenido de agua residual y el de saturación [ $L^3 L^{-3}$ ], respectivamente;  $\alpha$  es el valor de entrada de aire [ $L^{-1}$ ];  $n$  es el índice de distribución del tamaño de poros [-]; y  $l$  es el parámetro que indica la conectividad de los poros [-] (se ha utilizado un valor constante de 0,5). Así, en las ecuaciones anteriores se definen cinco parámetros hidráulicos independientes:  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$  y  $K_s$ .

Los parámetros hidráulicos iniciales utilizados son los que se han obtenido en la caracterización inicial de la ZNS (tabla 3).

**Tabla 3.** Parámetros hidráulicos iniciales.

| Material | $\theta_r$ | $\theta_s$ | $\alpha$     | $n$  | $K_s$                |
|----------|------------|------------|--------------|------|----------------------|
|          | (-)        | (-)        | ( $m^{-1}$ ) | (-)  | (m/s)                |
| 1        | 0,09       | 0,36       | 23           | 1,71 | $1,05 \cdot 10^{-6}$ |
| 2        | 0,09       | 0,36       | 51           | 1,47 | $1,62 \cdot 10^{-7}$ |
| 3        | 0,09       | 0,36       | 51           | 1,46 | $2,31 \cdot 10^{-8}$ |

### 3.4.2. Condiciones iniciales

Para resolver la ecuación (1) es necesario conocer la distribución inicial de las presiones matriciales o del contenido de agua en el dominio del flujo (8). En el modelo se han utilizados los valores de humedad medidos en el campo en la fecha de inicio del estudio.

$$\begin{aligned} h(x,t) &= h_i(x) & t &= t_0 \\ \theta(x,t) &= \theta_i(x) & t &= t_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde  $h_i$  [L] y  $\theta_i$  [ $L^3 L^{-3}$ ] son funciones espaciales prescritas, y  $t_0$  es el tiempo inicial de la simulación.

### 3.4.3. Condiciones de contorno

En superficie se utilizó la opción de condición atmosférica con escorrentía. De esta manera, en la superficie del terreno las condiciones de contorno están definidas por los datos diarios de riego, lluvia y la evaporación y transpiración potencial.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia  $ET_0(t)$ , se ha basado en el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). La evapotranspiración potencial  $ET_p(t)$  se define según (9).

$$ET_p(t) = K_c(t) \times ET_0(t) \quad (9)$$

Donde  $K_c(t)$  es el coeficiente de cultivo de la planta, que caracteriza la absorción de agua y la evaporación respecto un cultivo de referencia (Allen et al., 1998).

Para la condición de contorno inferior se ha considerado que la opción de drenaje libre es la que más se ajusta al modelo conceptual en este estudio.

Esta condición se implementa según (10), considerando un gradiente unitario:

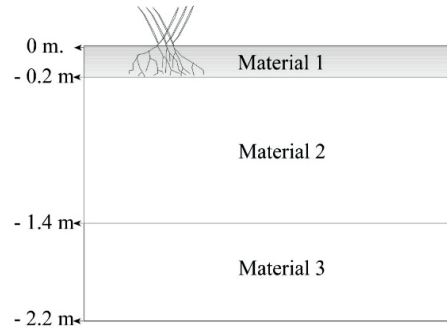
$$-K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) = q_0(t) \quad \text{a } x = 0 \quad (10)$$

Donde  $q_0$  [ $LT^{-1}$ ] es el flujo de agua en el contorno, y  $x = 0$  es el contorno inferior.

## 3.5 Modelo conceptual

A partir de la caracterización realizada y las observaciones de campo, se definió la geometría del modelo. La ZNS modelada tiene una profundidad de 2,2 m, y consta de 3 capas (Figura 4). La capa 1 corresponde a la zona radicular (0 a 0,2 m de profundidad); y las capas 2 y 3 corresponden

a la zona vadosa intermedia, situados entre 0,2 y 1,4 (material 2), y entre 1,4 y 2,2 m (material 3).



**Fig 4.** Representación esquemática del modelo conceptual.

Para la discretización espacial se ha definido una malla homogénea de 220 elementos y 221 nudos, dando lugar a elementos de 1 cm de profundidad.

La unidad temporal definida es de un día, con unos pasos de tiempo que varían entre 0,01 y 0,1.

La serie temporal de la información disponible ha sido dividida en dos fases: la primera se ha utilizado para calibrar el modelo y comprende el periodo entre el 04/07/2000 y el 03/07/2001; y la segunda fase ha sido empleada en la validación para el periodo entre el 04/07/2001 y el 31/12/2001.

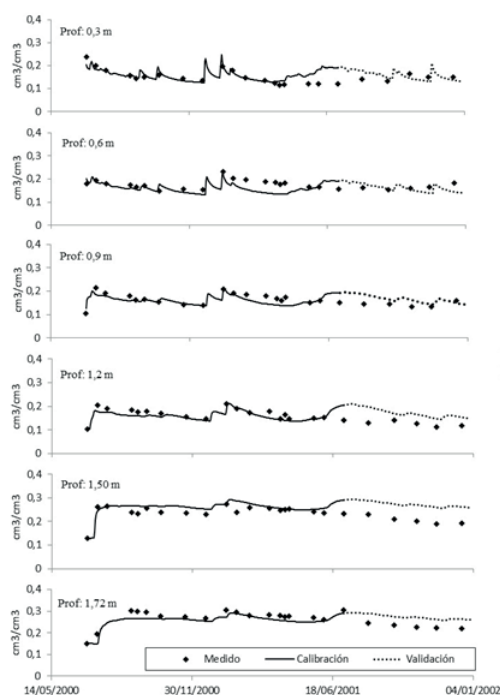
Para calibrar el modelo se ha realizado un primer ajuste manual y se analizó la respuesta del modelo respecto las variaciones los diferentes parámetros hidráulicos calibrados ( $\alpha$ ,  $n$  y  $K_s$ ). Con el ajuste manual se ha realizado una calibración automática mediante la aplicación del algoritmo de optimización de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963), disponible en HYDRUS1D.



## 4. RESULTADOS

El resultado final muestra un buen ajuste entre los valores observados y simulados del contenido de humedad en el terreno (figuras 5 y 6). Los valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en la calibración se muestran en la tabla 4.

El balance de masas muestra errores inferiores a 0,1 % en todos los pasos de tiempo, en el último paso el error es de 0,0054 %.

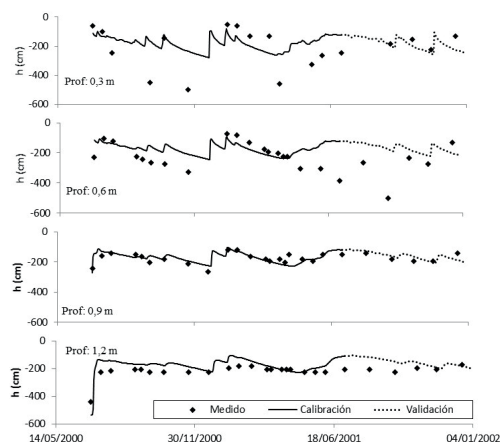


**Fig 5.** Evolución del contenido de humedad simulada a distintas profundidades durante las fases de la modelación respecto las medidas de campo.

En la figura 5 el ajuste de los valores de humedad volumétrica medidos y simulados es similar entre los periodos de simulación y validación, respecto a las capas 1 y 2 (puntos de observación situados entre la

superficie y 1,40 m de profundidad). Para la capa 3 (puntos de observación situados a 1,5 y 1,72 m de profundidad) si bien el modelo capta la tendencia, los ajustes no son tan buenos. La falta de ajuste en la capa 3 puede deberse a errores en las medidas realizadas con la sonda TDR, a afectaciones al flujo producidas por la presencia de raíces procedentes de unos árboles de gran tamaño próximos y no contemplado en el modelo, o a la presencia de humedad de condensación en el fondo del tubo de teganato en el que se introduce la sonda.

La modelización de la succión matricial (figura 6) no simula tan bien los valores observados en campo, especialmente en las capas superiores aunque sí se obtienen ajustes muy buenos en los puntos de observación superiores. Las causas del peor ajuste se atribuyen a la mayor variabilidad de los datos medidos, especial posición de los sensores en la parcela respecto a los aspersores y presencia de árboles de gran tamaño, que pudieron generar diferencias entre el aporte de agua y evapotranspiración considerados.



**Fig 6.** Evolución de la succión matricial simulada a distintas profundidades durante las fases de la modelación respecto las medidas de campo.



El valor de  $R^2$  para los valores simulados respecto los medidos es de 0,901, considerado aceptable para este tipo de problema (Wallis, et al., 2011). Los índices MAE (mean weighted absolute error) y RMSE (root mean square weighted error) presentan valores muy bajos: 0,042 y 0,056 respectivamente; lo que es indicador de la bondad del ajuste.

**Tabla 4.** Parámetros hidráulicos calibrados.

| Material | $\alpha$<br>( $\text{m}^{-1}$ ) | $n$<br>(-) | $K_s$<br>( $\text{m/s}$ ) |
|----------|---------------------------------|------------|---------------------------|
| 1        | 10,2                            | 1,46       | $6,37 \cdot 10^{-6}$      |
| 2        | 1,5                             | 2,42       | $4,63 \cdot 10^{-6}$      |
| 3        | 1,8                             | 1,35       | $4,05 \cdot 10^{-6}$      |

Los valores de los parámetros hidráulicos ajustados obtenidos en la fase de calibración fueron posteriormente validados empleando para ello el periodo de tiempo 04/07/2001-31/12/2001. Los resultados obtenidos muestran unos ajustes similares a los obtenidos durante el periodo de calibración (figuras 5 y 6).

El balance de masas continúa mostrando errores bajos, inferiores a 0,5 % en todos los pasos de tiempo, en el último paso el error es de 0,07 %.

#### 4.1. Estimación de la recarga

Una vez se dispone del modelo de flujo validado, se ha realizado una estimación de la recarga al acuífero, considerando como recarga todo aquel flujo que desciende por debajo de los 2.20 m de profundidad (límite inferior del modelo numérico).

El valor total de flujo acumulado para el período simulado es de 569 mm, con una recarga para el año 2001 de 451 mm.

Este valor es coherente con el obtenido con métodos tradicionales; mediante un balance en el suelo realizado con EASSY\_BAL\_3, el valor obtenido fue de 413 mm para el año 2001.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante el código HYDRUS-1D y a partir de los datos obtenidos en campo y la caracterización en el laboratorio se ha realizado un modelo de flujo de agua de la ZNS de la parcela experimental situada en el campo de golf “Serres de Pals”.

Los resultados obtenidos durante el proceso de calibración han permitido ajustar los valores de los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), y los parámetros de forma de entrada de aire ( $\alpha$ ), y el índice de distribución del tamaño de poros ( $n$ ) según el modelo de van Genuchten. Los valores obtenidos son coherentes con las características observadas en la parcela experimental. En la fase de validación se han obtenido resultados consistentes que avalan la bondad del modelo de flujo desarrollado.

La recarga al acuífero, estimada a partir del modelo validado, para el año 2001 (451 mm) es similar a la obtenida mediante otros métodos de balance, indicativo de la validez de los datos obtenidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos se considera que el modelo puede ser utilizado como base para futuros estudios de transporte tanto conservativo como reactivo.

*Agradecimientos.* Los autores agradecen la financiación recibida de los proyectos HID99-438 y CGL2013-48802-C3 la para la realización de este estudio.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G., Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage. Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy.
- Candela, L.; Fabregat, S.; Josa, A.; Chu, X. y Mariño M. (2001): Modelado del transporte del herbicida 2,4-D a través de la ZNS. *Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. V*. Eds. J. J. López y M. Quemada.
- Candela, L.; Fabregat, S.; Josa, A.; Suriol, J.; Vigues, N. y Mas, J. (2007): Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case of study: Application in a golf course (Girona, Spain). *Science of the Total Environment* 374 (2007) 26 - 35.
- Cohen, S; Svrjcek, A; Durborow, T; Barnes, L (1999) Water Quality Impacts by Golf Courses. *J. Environ. Qual.* 28: 798-809.
- Fabregat, S.; Candela, L.; Josa, A. y Mas, J. (2002): Reutilización de aguas residuales urbanas tratadas para regadío en campos de golf. *Aguas subterráneas y desarrollo humano. XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002*. Mar del Plata. Argentina.
- Feddes, R. A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H., (1978): Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *John Wiley and Sons*, NY.
- Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.T., Candela, L., 2009. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology.*, 367(1-2): 138-149.
- Marquardt, D., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- Mas-Pla, J. Bach, J y Montaner, J. (1998): Distribución de los compuestos de nitrógeno en el sistema hidrogeológico Baix Ter- Gavarres. La contaminación de las aguas un problema pendiente. Eds.Samper, et al 39-145.
- Montaner, J; Solà, J; Mas-Pla, J y Pallí, LL. (1995): "Aportació al coneixement de l'evolució geològica recent de la Plana del Ter. Baix Empordà". Institut d'Estudis del Baix Empordà. Estudis sobre el Baix Empordà. vol 14. 11 pp.
- Muallem, Y. (1976): A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513-522.
- Mujeriego, R. y Asano, T. 1991: Wastewater reclamation and reuse. Proc. Int Symp. Wastewater reclamation and reuse. Gerona. *Wat. Sci. and Tech.*, 24(9) 364 pp.
- Pettygrove, G. S. y Asano, T. 1984: Irrigation with reclaimed municipal wastewater. A guidance manual, California State *Water Res.* Control Board. Davis. California. 540 pp.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE nº 294, de 8 de diciembre de 2007.
- Rubio, C.; Llorens, P. y Van Genuchten, M. Th. (2005): Modelización del flujo transitorio en suelos franco-limosos utilizando Hydrus 1D. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII*. F.J. Samper Calvete y A. Paz González, 2005. pag 257 – 261.
- Šimůnek, J.; Van Genuchten, M. Th. y Šejna, M. (2016): Recent developments and applications of the HYDRUS software packages. *Vadose Zone Journal*, june 2016.
- USEPA. 1992: Manual: Guidelines for water reuse. EPA/652/R-92/004. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
- Valdés, J.; Jiménez, J. y Candela, L. (2014): Comparison among monitoring strategies to assess water flow dynamic and soil hydraulic properties in agricultural soils. *Soil Science. Volume 179, number 8*, august 2014.
- Valdés, J.; Jiménez, J. y Candela, L. y Tamoh, K. (2015): Comparison among monitoring strategies to assess water flow dynamic and soil hydraulic properties in agricultural soils. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 13(1). e12-001, 15 pages.
- Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- Wallis, K.J., Candela, L., Mateos, R.M., Tamoh, K., 2011. Simulation of nitrate leaching under potato crops in a Mediterranean area. Influence of frost prevention irrigation on nitrogen transport. *Agricultural Water Management.*, 98(10): 1629-1640.